Al-Si-Ge 钎料钎焊 Cu/Al 接头组织与性能研究

牛志伟 叶 政 刘凯凯 黄继华 陈树海 赵兴科

(北京科技大学材料科学与工程学院 北京 100083)

摘 要 首次采用 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料对 Cu/Al 异种金属进行了炉中钎焊，分别从钎料的熔化特性、铺展润湿性、Cu 侧界面组织结构以及钎焊接头强度等方面进行了系统研究，并与 Zn-22Al 钎料钎焊结果进行对比。结果表明，Al-5.6Si-25.2Ge 钎料具有较低的熔化温度(约 541℃)，同时在 Cu、Al 母材上均具有良好的铺展润湿性。Al-5.6Si-25.2Ge/Cu 界面由 $CuAl_2$/CuAl/Cu_3Al_2 三层化合物组成，其中 CuAl 和 Cu_3Al_2 呈平面状，厚度较薄，仅为 1~2 μm；$CuAl_2$ 呈胞状，平均厚度约为 3 μm。Zn-22Al/Cu 界面结构为 $CuAl_2$/CuAl/Cu_9Al_4，而界面层平均厚度高达 15μ m。接头抗剪强度测试结果表明，Zn-22Al 钎料钎焊接头抗剪强度仅为 42.5 MPa，而 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料钎焊 Cu/Al 接头具有更高的抗剪强度，为 53.5 MPa。

关键词 Al-Si-Ge 钎料，Cu/Al 接头，界面组织，抗剪强度

中图分类号 TG425.2 文章编号 0412-1961(2017)00−0000−00

Microstructure and Property of Cu/Al Joint Brazed with Al-Si-Ge Filler Metal

NIU Zhiwei, YE Zheng, LIU Kaikai, HUANG Jihua, CHEN Shuhai, ZHAO Xingke

School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Correspondent: HUANG Jihua, professor, Tel: (010)62334859, E-mail: hjihua62@sina.com

Supported by Guangdong Provincial Science and Technology Project (No.2010A080402014)

Manuscript received 2016-08-01, in revised form 2017-01-05

ABSTRACT Cu/Al brazing has good prospect for applications in the air conditioning and refrigeration industry. A suitable filler metal is the key of Cu/Al brazing. The chemical and physical properties of the filler metal have great influence on the brazing process and parameters. And the strength of the brazing joint is closely related to the properties of the filler metal and the brazing process. While the previous studies have not developed a kind of Cu/Al brazing filler metal which can achieve a tough joint at a low brazing temperature. In this work, the Al-5.6Si-25.2Ge filler metal was first used to braze Cu/Al dissimilar metals, and the melting characteristics of the filler metal, spreading wettability, Cu interfacial structure and strength of brazed joint were investigated systematically. Additionally, the common Zn-22Al filler metal was also used for comparison. The results show that the Al-5.6Si-25.2Ge filler metal possesses low melting temperature (about 541 ℃) and excellent spreading wettability on Cu and Al base metals. The interfacial structure of Al-5.6Si-25.2Ge/Cu was $CuAl_2$/CuAl/Cu_3Al_2. The thickness of planar CuAl and Cu_3Al_2 phases was only 1~2 μm, and the thickness of cellular $CuAl_2$ phase was about 3 μm. The interfacial structure of Zn-22Al/Cu was $CuAl_2$/CuAl/Cu_9Al_4, but the average thickness of the interface layer was up to 15 μm. The test results of the shearing strength show that the shearing strength of the Cu/Al joint brazed with Zn-22Al filler metal was only 42.5 MPa, but the shearing strength brazed with Al-5.6Si-25.2Ge filler metal was higher (53.5 MPa).

KEY WORDS Al-Si-Ge filler metal, Cu/Al joint, interfacial structure, shearing strength

---

资助项目 广东省科技计划项目 No.2010A080402014

收稿日期 2016-08-01 **定稿日期** 2017-01-05

作者简介 牛志伟，男，1986 年生，博士

通讯作者 黄继华，hjihua62@sina.com，主要从事先进材料焊接与连接技术的研究

DOI 10.11900/0412.1961.2016.00342

“Al代Cu”是目前工业生产中为降低成本而提出的，其技术关键是解决Cu/Al异种金属的连接问题[1~3]。目前，最理想的方法是钎焊连接[4,5]，采用钎焊技术可以获得强度较高和气密性良好的接头。常用于Cu/Al异种金属钎焊的钎料主要有Sn-Zn系[6~8]、Zn-A1系[9~11]和Al-Si系[12,13]。Sn-Zn系钎料钎焊Cu/Al接头的强度较低，抗腐蚀性能较差。Zn-Al系钎料，因其钎焊Cu/Al接头的强度较高，是目前Cu/Al钎焊常用的钎料，尤其是Zn-15Al和Zn-22Al钎料[14]。但由于Zn-Al钎料与Cu、Al母材的电极电位相差较大，因此钎焊接头极易引起电化学腐蚀[15]。

Al-Si钎料主要为Al-Si共晶成分点附近的钎料。左柯等[16]和郑剑锋等[17]对适用于Cu/Al钎焊的Al-Si和Zn-Al钎料的抗腐蚀性能进行了对比研究。结果表明，相对于Zn-Al钎料，Al-Si钎料具有更加优异的抗腐蚀性能。此外，Al-Si钎料具有优异的钎焊工艺性能[18]。然而，由于Al-Si钎料熔点较高，钎焊Cu/Al时极易引起Al母材一侧的过烧软化[19]；同时，采用Al-Si钎料需要更高的钎焊温度，Cu侧界面易发生剧烈的界面反应，生成大量的脆性金属间化合物，导致钎焊接头强度极低，接头抗剪切强度不超过20 MPa[13,20]。

Al-Si-Ge 钎料较之传统 Al-Si 钎料具有较低的熔点和更优的铺展润湿性，在 Al 及铝合金钎焊中得到广泛应用[21,22]。本工作将 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料作为研究对象[15,23]，首次尝试用于钎焊 Cu/Al 异种金属，对钎焊接头中 Cu 侧界面组织及接头性能进行分析，并与 Zn-22Al 钎料进行对比研究。

1 实验方法

实验所用钎料成分为 Al-5.6Si-25.2Ge、Zn-22Al 和 Al-12Si (质量分数，%)。其中 Zn-22Al 为常用的商业钎料，作为钎焊接头组织和性能研究的对比钎料；Al-12Si 为共晶钎料，因其钎焊 Cu/Al 接头强度极低[10,17]，仅作为钎料熔点研究的对比钎料。所有钎料均采用纯度 99.999%的 Ge、99.999%的 Zn、99.99%的 Si 和 99.6%的 Al 为原材料，在井式坩埚炉中进行熔炼，为了防止钎料合金在熔炼过程中被氧化，采用 NaCl:KCl＝1:1 (质量比)熔盐进行覆盖保护。熔化后进行充分搅拌，以尽量减少元素在金属液中的比重偏析。

2 种钎料在 Cu、Al 母材上的铺展润湿性测试在 Ar 气保护钎焊炉中进行，钎料的质量为 0.15 g，所用钎剂为自行研制的 AlF_3-KF-KCl-CsF 无腐蚀钎剂，熔化区间为 415~488 ℃。钎焊接头采用搭接的形式，母材采用尺寸为 60 mm×20 mm×3 mm 的 1060 纯 Al 板和 60 mm×20 mm×2 mm 的 TP2 脱氧纯 Cu 板，搭接长度为 2 mm，搭接间隙控制在(0.3±0.05) mm，钎料的质量为 0.2 g，钎焊接头装配示意图如图 1 所示。在实际应用中，钎焊温度高于钎料熔点 25~60 ℃时，钎焊工艺性能最佳[24]，所以本实验采用的铺展和钎焊实验温度均为高于钎料液相线温度 30 ℃。

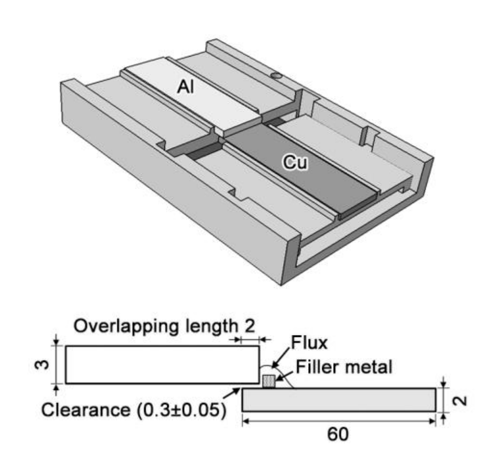


图 1 接头装配示意图

Fig.1 Schematic of the brazed specimen (unit: mm)

采用CR-G型高温差热分析仪(DTA)测定钎料合金的熔化温度，加热速率为15 ℃/min。采用XTZ-AT体视显微镜对铺展实验试样进行拍照，并利用ImageTool3.0软件对铺展面积进行测量。采用Quanta 250型扫描

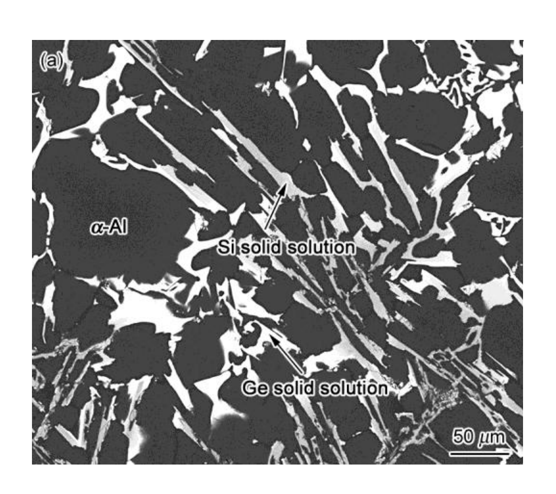
电子显微镜(SEM)和其附带的能谱仪(EDS)对 Cu/Al 接头界面结构和断口形貌以及Cu/Al 接头界面化合物成分进行分析。采用MiniFlex 600 X射线衍射仪(XRD，Cu K_α)对钎料合金的相组成进行分析。实验过程中，炉膛升温速率40 ℃/min，钎焊保温时间40 s，钎焊接头取出后空冷至室温。Cu/Al钎焊接头的抗剪切强度按照GB/T11363-2008，采用MTS810型万能材料试验机进行测试，为保证结果的准确性，每种钎料成分钎焊3组试样，取平均值作为最终结果。

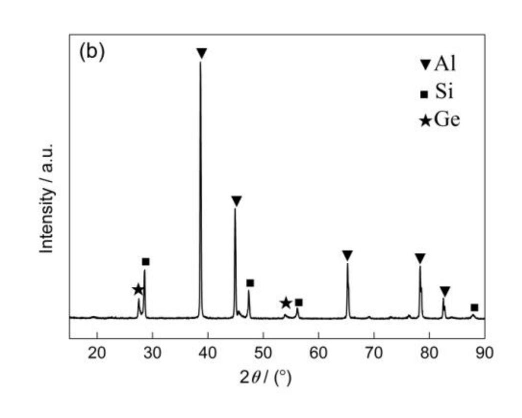
2 实验结果与讨论

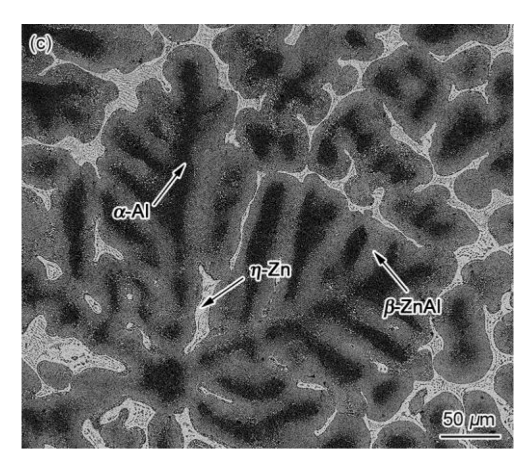
2.1 钎料显微组织

Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料显微组织和相组成如图 2 所示。结合 EDS 分析可知，Al-5.6Si-25.2Ge 钎料中，长条状灰色相为 Ge 在 Si 中的固溶体；块状亮白色相为 Si 在 Ge 中的固溶体；黑色基体为 *α*-Al 相，均匀分散于整个钎料区。为进一步确定 Al-Si-Ge 钎料合金的相组成，对钎料合金进行了 XRD 分析。图 2b 为 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料合金的 XRD 谱，证实了 Al-Si-Ge 钎料合金是由 α-Al 相、Si 固溶体相和 Ge 固溶体相组成。

如图 2c 和 d 所示，Zn-Al 钎料的基体组织主要为 α-Al 相、β-ZnAl 相和 η-Zn 相，其中粗大的树枝晶为 β-ZnAl 相，树枝晶内部为 η-Zn 相，间隙中的黑色相为 α-Al 相。β-ZnAl 相是铝基固溶体或以 ZnAl 为基的有序固溶体，通常情况下，β 相只在中温区(443~275 ℃)存在，降温通过共析温度时将发生共析转变：β→α-Al+η-Zn，由于钎料合金在熔炼过程中凝固速度较快，导致 β-ZnAl 相没有来得及完全转变为 η-Zn 相，从而钎料组织中有 β-ZnAl 相的存在[24]。







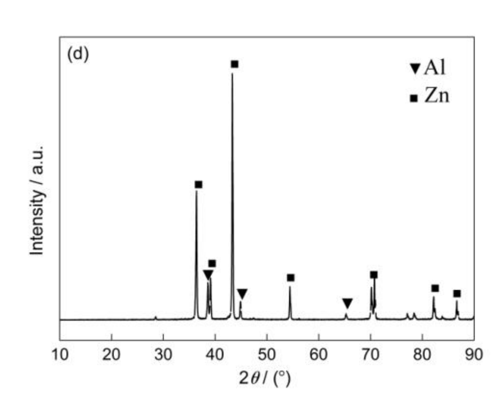


图 2 Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料的 SEM 像及 XRD 谱

Fig.2 SEM images (a, c) and XRD spectra (b, d) of Al-5.6Si-25.2Ge (a, b) and Zn-22Al (c, d) filler metals

2.2 钎料的熔化特性

图 3 所示为 Al-12Si、Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料合金的 DTA 曲线。从图中可以看出，Al-12Si 钎料合金的液相线温度最高，为 585 ℃；Al-5.6Si-25.2Ge 钎料的液相线温度比 Al-12Si 钎料下降了 44 ℃，可以在更低的温度下实现 Cu/Al 钎焊，防止母材过烧软化；Zn-22Al 钎料的液相线温度最低，为 490 ℃。结合 Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料的液相线温度，设定 Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料的钎焊温度分别为 571 和 520 ℃。

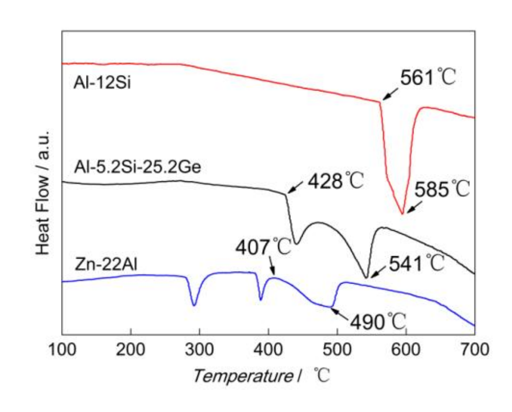


图 3 钎料的 DTA 曲线

Fig.3 DTA curves of filler metals

2.3 钎料的铺展润湿性

在钎焊过程中，钎料在 Cu、Al 母材上的铺展面积反应了钎料润湿填缝的能力。经测量，Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料在 Al 母材上的平均铺展面积分别为 566.2 和 478.5 mm^2，由于 Zn 在 Al 中具有极大的固溶度，导致 Zn 向 Al 母材中产生严重的晶间渗透，减弱了 Zn-Al 钎料在 Al 母材上的铺展。相对于在 Al 母材上的铺展，Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料在 Cu 上的铺展面积均较小，分别为 119.6 和 69.8 mm^2，但 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料的铺展面积更大，约为 Zn-22Al 钎料的 2 倍。因此，相对于 Zn-22Al 钎料而言，Al-5.6Si-25.2Ge 钎料在 Cu、Al 母材上均具有较好的铺展润湿性，更有利于实现 Cu/Al 异种金属的钎焊连接。

2.4 Cu/Al 接头中 Cu 侧界面组织结构

Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料钎焊 Cu/Al 接头 Cu 侧界面显微组织如图 4 所示。表 1 为图 4 中典型相的 EDS 分析结果。如图 4a 所示，Al-Si-Ge 钎料与 Cu 母材发生了明显的界面反应，可明显观察到 3 层界面结构：I 层、II 层、III 层。I 层厚度较大，呈胞状或树枝状，根据成分分析可判断为 $CuAl_2$ 相；II 层厚度较小为 1 μm 左右，呈层状、分布均匀连续，根据 EDS 分析可判断为 CuAl 相；III 层最靠近 Cu 母材侧，界面层厚度为 2 μm 左右，EDS 分析表明为 Cu_3Al_2 相。对 Al-Si-Ge 钎料/Cu 界面区进行元素线扫描分析(图 4b)，观察到三层化合物中 Cu、Al 元素的分布规律，证实了 Al-Si-Ge 钎料/Cu 界面处由 $CuAl_2$/CuAl/Cu_3Al_2 三层化合物组成。Al-Si-Ge 钎料中的 Ge 元素没有参与界面反应，靠近界面处在 $CuAl_2$ 相(A)之间分布着灰白色的相(D)，EDS 分析结果表明灰白色的相是 Ge 的固溶体相。

图 4c 所示为 Zn-Al 钎料钎焊 Cu/Al 接头 Cu 侧界面组织结构。可以看出 Cu 侧界面同样包含 3 个化合物层。结合表 1 中 EDS 分析结果以及图 4d 中的元素分布规律，可以得出 Zn-Al 钎料/Cu 界面处由 $CuAl_2$/CuAl/Cu_9Al_4 三层化合物组成，其中 $CuAl_2$ 层厚度较大，平均厚度约为 15 μm。

Cu/Al 钎焊接头中 Cu 侧界面是最薄弱的区域，因为 Cu 侧界面极易形成复杂的化合物层，严重制约着 Cu/Al 钎焊接头的力学性能。当采用 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料钎焊 Cu 和 Al 时，Cu 侧界面生成 $CuAl_2$/CuAl/Cu_3Al_2 化合物层，CuAl 和 Cu_3Al_2 化合物靠近 Cu 母材侧，厚度极薄。$CuAl_2$ 化合物硬度高而塑性低，抵抗裂纹扩

展能力低，对 Cu/Al 钎焊接头强度起决定性作用。对比图 4a 和 c，可以看出采用 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料钎焊 Cu/Al 接头，$CuAl_2$ 层呈胞状生长在 Cu 侧界面上，$CuAl_2$ 相之间分布着 Ge 固溶体相， Ge 固溶体相的存在阻碍了 $CuAl_2$ 相的大片状生长。而采用 Zn-22Al 钎焊 Cu/Al 接头，Cu 侧界面 $CuAl_2$ 层呈大片状分布在 Cu 侧界面处，厚度远大于采用 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料钎焊接头。采用 Zn-22Al 钎料时，钎焊温度较采用 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料时更低，一般情况下，在较低温度下原子的扩散速率会更低，界面反应以及界面化合物的生长速率也相应较低。但是实验结果显示 Zn-22Al 钎料与 Cu 母材侧的界面反应反而更为容易，界面化合物生长更为迅速。仔细分析接头界面处的化合物层可以发现，当采用 2 种不同的钎料时，Cu/Al 钎焊接头界面处的化合物种类发生了变化。在最靠近 Cu 母材一侧的位置，当采用 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料时，生成的金属间化合物为 Cu_3Al_2，该化合物为六方结构，晶格常数 a=0.4146 nm，c=0.5063 nm；而当 Zn-22Al 钎料时，生成的金属间化合物为 Cu_9Al_4，该化合物为简单立方结构，晶格常数 a=0.8702 nm。Cu 原子半径为 0.1278 nm，Al 原子半径为 0.182 nm。根据 2 种化合物的晶格类型以及晶格常数可以推断，Cu_3Al_2 的致密度较 Cu_9Al_4 高。在钎焊过程中，当靠近 Cu 一侧生成的金属间化合物为 Cu_3Al_2 时，Cu 原子继续向钎缝内部方向扩散的阻力大大增加，因此导致靠近钎料金属一侧的化合物生长受到抑制。具体体现为在利用 Al-5.6Si-25.2Ge 钎料钎焊 Cu/Al 时，即使钎焊温度高于 Zn-22Al 钎料钎焊温度，但是界面化合物层厚度，特别是靠近钎缝侧的 $CuAl_2$ 化合物厚度明显小于利用 Zn-22Al 钎料钎焊的接头。

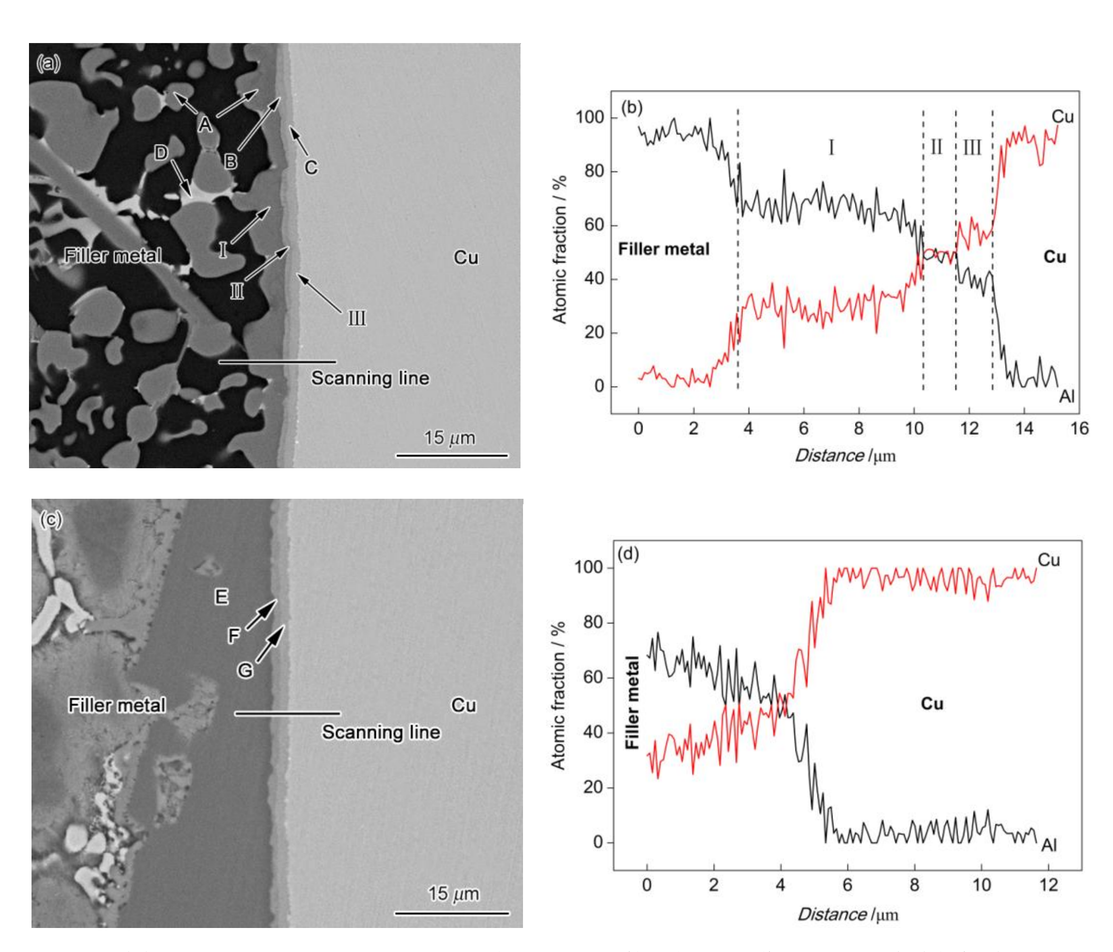


图 4 Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料钎焊 Cu/Al 接头的 SEM 像和 EDS 元素线扫描结果

Fig.4 SEM images (a, c) and EDS element line scanning along the lines in Figs.4a and c (b, d) of Cu/Al joints brazed with Al-5.6Si-25.2Ge (a, b) and Zn-22Al (c, d) filler metals

表 1 图 4 中 Cu/Al 接头界面区物相的 EDS 分析结果

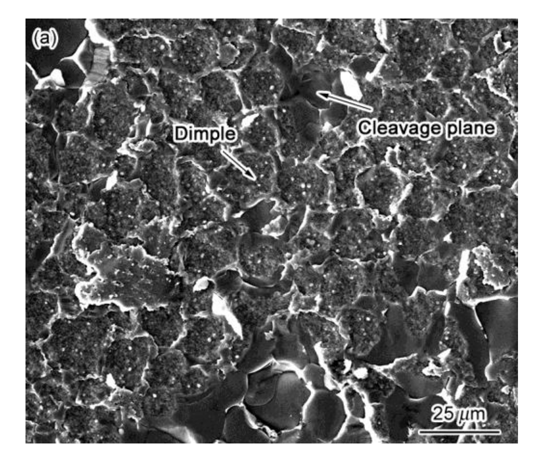
Table 1 EDS results of phases in the interfacial zones of the Cu/Al joints in Fig.4

Position	Atomic fraction / %				Possible phase
	Al	Cu	Ge	Si	
A	67.15	32.85	-	-	$CuAl_2$
B	48.22	51.78	-	-	CuAl
C	41.41	58.59	-	-	Cu_3Al_2
D	-	-	78.54	21.46	Ge solid solution
E	69.09	30.91	-	-	$CuAl_2$
F	51.17	48.83	-	-	CuAl
G	29.43	70.57	-	-	Cu_9Al_4

2.5 Cu/Al 接头抗剪切强度及断口分析

采用 Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料钎焊 Cu/Al 接头，Cu 侧界面结构在化合物种类和形态上存在较大的差异，这种差异势必对 Cu/Al 接头的力学性能产生显著的影响。2 种钎料钎焊 Cu/Al 接头所获得的抗剪切强度值差别较大，Zn-22Al 钎料钎焊 Cu/Al 接头强度值为 42.7 MPa，与文献[25]研究结果基本一致；Al-5.6Si-25.2Ge 钎料钎焊 Cu/Al 接头强度值较大，达到 53.4 MPa。

接头界面结构对接头强度的影响直接反映在接头的断口形貌上。图 5 分别为 2 种钎料钎焊 Cu/Al 接头 Cu 母材一侧的断口形貌，钎焊接头均断裂于 Cu 母材/钎缝界面处，结合断裂试样界面的典型 SEM 像(图 6)分析可知，断裂位置位于 $CuAl_2$ 化合物的根部。裂纹萌生于 $CuAl_2$ 化合物的根部，并在该化合物内部扩展，不管是用哪一种钎料钎焊的 Cu/Al 接头，其断裂位置完全处于 $CuAl_2$ 化合物的内部。接头的断裂与 $CuAl_2$ 化合物有非常大的关系，大厚度的 $CuAl_2$ 化合物片层对结构变形的耐受力非常低，是导致接头断裂失效的直接原因。Cu/Al-5.6Si-25.2Ge/Al 接头断口形貌如图 5a 所示，断口分布着大量的撕裂棱及较浅的韧窝，钎焊接头表现出明显的韧性断裂特点；此外，断口表面也可观察到脆性断裂所产生的解理面，Al-5.6Si-25.2Ge/Cu 母材界面化合物层厚度较小，且带有胞状突起，裂纹扩展所需能量较大，是接头出现大量撕裂棱的主要原因，Cu/Al-5.6Si-25.2Ge/Al 钎焊接头也因此具有较高的抗剪切强度，为 53.4 MPa。图 5b 所示为 Cu/Zn-22Al/Al 接头断口形貌，可以看出断口表面仅有少量撕裂棱，大部分区域为具有脆性断裂特征的解理面，这与钎焊接头中 Cu 侧界面存在厚度较大的 $CuAl_2$ 层有关，钎焊接头抗剪切强度也因此较低，为 42.7MPa。



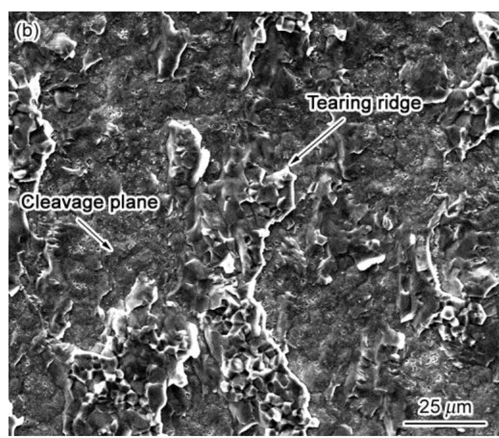


图 5 Al-5.6Si-25.2Ge 和 Zn-22Al 钎料钎焊 Cu/Al 接头断口的 SEM 像

Fig.5 SEM images of the fracture surface of the Cu/Al joints brazed with Al-5.6Si-25.2Ge (a) and Zn-22Al (b) filler metals

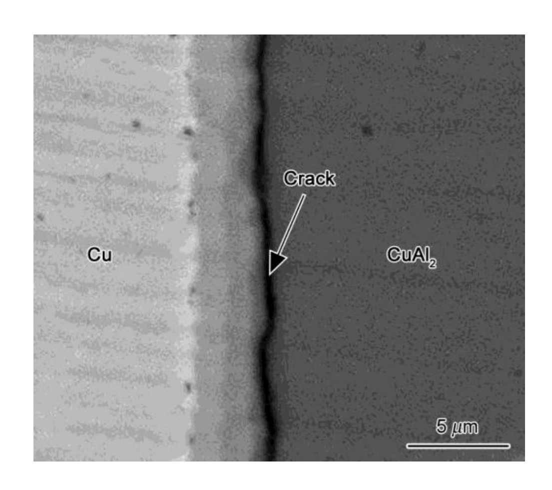


图 6 典型的 Cu/Al 钎焊接头断裂位置的 SEM 像

Fig.6 Typical SEM images of the fracture position of the Cu/Al joints

3 结论

(1) 首次采用Al-5.6Si-25.2Ge钎料钎焊Cu/Al异种金属，由于钎料具有较低的熔点和优异的铺展润湿性，成功实现了Cu/Al钎焊接头的连接。

(2) Al-5.6Si-25.2Ge/Cu界面处由$CuAl_2$/CuAl/Cu_3Al_2三层化合物组成，其中CuAl和Cu_3Al_2呈层状，厚度较薄，为1~2 μm；$CuAl_2$呈胞状，平均厚度约为3 μm，钎焊接头抗剪切强度较高，为53.4 MPa。Zn-22Al/Cu界面结构为$CuAl_2$/CuAl/Cu_9Al_4，其中$CuAl_2$层平均厚度高达15 μm，钎焊接头抗剪切强度仅为42.7 MPa。

(3) Cu/Al钎焊接头中Cu侧界面结构是影响钎焊接头强度的关键，Al-5.6Si-25.2Ge/Cu界面处$CuAl_2$层呈突起状钉扎于钎料层中，且厚度较薄，是Cu/Al-5.6Si-25.2Ge/Al钎焊接头抗剪切强度比Cu/Zn-22Al/Al高的原因。

参考文献

[1] Ning F Z. Low Temperature friction welding of aluminum to copper [J]. Acta Metall. Sin., 1978, 14: 179
(宁斐章. 铝—铜低温摩擦焊 [J]. 金属学报, 1978, 14: 179)
[2] Zhang H T, Liu D, Feng J C, et al. Reactive contact brazing between aluminium alloy and copper by high frequency induction metho[J]. Trans. China Weld. Inst., 2012, 33(003): 89
(张洪涛, 刘 多, 冯吉才等. 铝/铜高频感应接触反应钎焊 [J]. 焊接学报, 2012, 33(003): 89)
[3] Cong Q, Xu F M, Tan Y, et al. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of Al/Al-Cu graded materials [J]. Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.), 2011, 24: 118 [4] Easton D, Zhang Y, Wood J, et al. Brazing development and interfacial metallurgy study of tungsten and copper joints with eutectic gold copper brazing alloy [J]. Fusion Eng. Des., 2015, 98-99: 1956
[5] Fu W, Song X G, Hu S P, et al. Brazing copper and alumina metallized with Ti-containing Sn0.3Ag0.7Cu metal powder[J]. Mater. Des., 2015, 87: 579
[6] Xing F, Yao J, Liang J, et al. Influence of intermetallic growth on the mechanical properties of Zn−Sn−Cu−Bi/Cu solder joints [J]. J. Alloys Compd., 2015, 649: 1053
[7] Zhou J, Sun Y S, Xue F. Microstructures and properties of Sn-Zn-Bi solder alloys [J]. Acta Metall. Sin., 2005, 41: 743
(周 健, 孙扬善, 薛 烽. 低熔点Sn-Zn-Bi无铅钎料的组织和性能 [J]. 金属学报. 2005, 41: 743)
[8] Huang M L, Kang N, Zhou Q, et al. Effect of Ni Content on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Al/Sn-9Zn-xNi/Cu Joints [J]. J. Mater. Sci. Technol., 2012, 28: 844
[9] Xiao Y, Ji H, Li M, et al. Ultrasound-assisted brazing of Cu/Al dissimilar metals using a Zn−3Al filler metal [J]. Mater. Des., 2013, 52: 740

[10] Ji F, Xue S B, Lou J Y, et al. Microstructure and properties of Cu/Al joints brazed with Zn−Al filler metals [J]. T. Nonferr. Metal. Soc., 2012, 22: 281
[11] Ji F, Xue S B. Growth behaviors of intermetallic compound layers in Cu/Al joints brazed with Zn−22Al and Zn−22Al−0.05Ce filler metals [J]. Mater. Des., 2013, 51: 907
[12] Yan F, Xu D R, Wu S C, et al. Microstructure and phase constitution near the interface of Cu/3003 torch brazing using Al-Si-La-Sr filler [J]. J. Mech. Sci. Technol., 2012, 26: 4089
[13] Xia C Z, Li Y J, Puchkov U A, et al. Microstructure and phase constitution near the interface of Cu/Al vacuum brazing using Al–Si filler metal [J]. Vacuum, 2008, 82: 799
[14] Yang H, Huang J H, Chen S H, et al. Influence of the composition of Zn-Al filler metal on the interfacial structure and property of Cu/Zn-Al/Al brazed joint [J]. Acta Metall. Sin., 2015, 51: 364
(羊 浩，黄继华，陈树海等. Zn-Al钎料成分对Cu/Zn-Al/Al钎焊接头界面结构及性能的影响 [J]. 金属学报. 2015, 51: 364)
[15] Zhang Q Y, Zhuang H S. Brazing and Soldering Manual [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 55
(张启运，庄鸿寿. 钎焊手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 55)
[16] Zuo K, Zuo T J, Qiu G C, et al. Comparison of corrosion resistance between Al-Si brazing filler and Al-Zn brazing filler [A]. Proceedings of the Eleventh National Symposium on refrigerators, Air Conditioners and Compressors [C]. Anhui: National refrigerator, 2012: 293
(左柯, 左铁军, 邱国才等. Al-Si钎料和Al-Zn钎料抗腐蚀性能比较 [A]. 第十一届全国电冰箱(柜)、空调器及压缩机学术交流大会论文集 [C]. 安徽: 全国电冰箱, 2012: 293)
[17] Zheng J F, Chen D J, Cai Q, et al. Comparison of corrosion resistance between Al-Si brazing filler and Al-Zn brazing filler [J]. China. Aplnc. Technol., 2013, (10): 78
(郑建峰，陈德娟，蔡蔷，等. Al-Si钎料和Al-Zn钎料耐蚀性能对比研究 [J]. 家电科技. 2013, (10): 78)
[18] Hosch T, Napolitano R E. The effect of the flake to fiber transition in silicon morphology on the tensile properties of Al–Si eutectic alloys [J]. Mater. Sci. Eng., 2010, A528: 226
[19] Luo W, Wang L T, Wang Q M, et al. A new filler metal with low contents of Cu for high strength aluminum alloy brazed joints [J]. Mater. Des., 2014, 63: 263
[20] Liu H J, Shen J J. Progress in welding process of Al/Cu dissimilar metals [J]. Weld. Join., 2009, (03): 14
(刘会杰, 沈俊军. 铝/铜异种材料的焊接研究 [J]. 焊接, 2009, (03): 14)
[21] Niu Z, Huang J, Chen S, et al. Effects of germanium additions on microstructures and properties of Al–Si filler metals for brazing aluminum [J]. Trans. Nonferr. Metal. Soc., 2016, 26: 775
[22] Schubert T H, Loser W, Teresiak A, et al. Preparation and phase transformations of melt-spun Al-Ge-Si brazing foils [J]. J. Mater. Sci., 1997, 32: 2181
[23] Niu Z W, Huang J H, Yang H, et al. Preparation and Properties of a Novel Al-Si-Ge-Zn Filler Metal for Brazing Aluminum [J]. J. Mater. Eng. Perform., 2015, 24: 2327
[24] Yang L S, Wang H M, Chen Q D. High Aluminum Zn Alloys [M]. Xi’an: Northwestern Polytechnic University Press, 1997: 17
(杨留栓, 王洪敏, 陈全德. 高铝锌合金. 西安: 西北工业大学出版社, 1997: 17)
[25] Zhang M, Xue S B, Ji F, et al. Effect of Ag on properties of Zn-Al brazing filler metal [J]. Trans. China. Weld. Inst., 2010; 31(9): 73
(张 满, 薛松柏, 戴 玮等. Ag元素对Zn-Al钎料性能的影响 [J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 73)